Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 19, No. 4, Oct.-Nov. 2023, p. 451-462

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۹، شماره ۴، مهر - آبان ۱۴۰۲ ص. ۴۶۲-۴۵۱

Research Article
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Evaluation of Physicochemical and Microstructure Properties of Expanded Quinoa

E. Ghiami[1], A. Koocheki[2], E. Milani[3]*

Received: 2022.01.24
Revised: 2022.02.28
Accepted: 2022.03.08
Available Online: 2022.05.15

How to cite this article:
Ghiami, E., Koocheki, A., & Milani, E. (2023). Evaluation of physicochemical and microstructure properties of expanded quinoa. *Iranian Food Science and Technology Research Journal, 19*(4), 451-462. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2022.74911.1139

Introduction

Quinoa, which is known as the mother grain,has higher protein content than common cereals and possesses a large lysine content. Quinoa is composed mainly of carbohydrates (60-75%), of which 10-13% is dietary fiber. Quinoa also has a slightly higher protein content (12-16%) compared with cereal grains and fat content (5-9%) that is rich in unsaturated fatty acids. Quinoa seeds contain similar or slightly higheramounts of bioactive compounds such as polyphenols (2.7-3.8 g/kg). Moreover, quinoa is gluten-free, thus providing the ability to enhance the selection of gluten-free products forconsumers with celiac disease, but this type of characteristicis challenging to development of bakery products from quinoa with desirable physicochemical properties. Processing of cereal grains and pseudo-cereals into products that deliver a nutritive valueto consumers represents a considerable opportunity for large scale food processing. There havebeen some reported studies on roasting, extrusion, steam pre-conditioning and pearling of quinoafor further uses. Extrusion cooking is a promising technology for improvement of functional properties of quinoa flour. The Evaluation of physicochemical properties and microstructure of Expanded quinoa as affected by extrusion conditions was the main goal of this project.

Material and Methods

In this study, a parallel twin-screw extruder (Jinan Saxin, China) with die diameter of 3 mm was applied. The effects of extrusion process parameters including feed moisture content (14 and 16%) and die temperature (130, 150 and 170 °C) on final moisture content, bulk density, water absorption index (WAI), color parametersL* (lightness), a*(redness), b*(yellowness), hardness, and microstructure of Expanded quinoa were studied. Extrusion was carried out using a co-rotating twin screw extruder with L/D ratio of 10:1 and die diameter of 4 mm. The feed rate of flour and the screw speed were set at 40 kg/h and 200 rpm, respectively. The physicochemical properties were measured using standard methods. The hardness measurement was performed by a texture analyzer. The cylinder steel probe (2 mm diameter) was set to move at a speed of 1 mm/s The samples were punctured by the probe to a distance of 10 mm . The color parameters of the samples were determined by the Hunterlab machine. The morphology of samples was assessed using a scanning electron microscopy (SEM).

1 and 2- Former M.Sc. Student and Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively.
3- Iranian Academic Center for Education Culture and Research (ACECR), Khorasan Razavi, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: e.milani@jdm.ac.ir)
DOI: 10.22067/ifstrj.2022.74911.1139

Results and Discussion

A comprehensive study on impacts of extrusion processing conditions on quinoa flour was conducted. The effect of process variables on the physicochemical attributes of the extrudates was observed. the expanded quinoa with higher feed moisture content had greater moisture and those extruded at higher die temperatures showed lower moisture content ($p<0.05$). Moisture can reduce the shear force as a plasticizer and increase the amount of moisture absorption of the product. While increasing the die temperature, the effect of shear force on starch dextrification increases and reduces moisture absorption ($p<0.05$). WAI was significantly influenced by extrusion variables. In fact, feed moisture content and die temperature both positively changed the WAI of quinoa flour so that all extruded samples had significantly higher WAI than the untreated sample ($p<0.05$). Moreover, the sample with the higher feed moisture content (24%) treated at the highest extrusion temperature (170 °C) showed the largest and lowest water absorption and Hardness respectively ($p<0.05$). Another important feature of expanded quinoa is the lightness index, the results revealed that extrusion cooking caused a reduction in L* and enhancements in a* and b*. While changes in color parameters were more pronounced at more severe die temperature, higher feed moisture content counteracted the effects of cooking temperature on the color of the products. As expected from changes in the abovementioned color parameters, the sample with lower feed moisture content (16%) treated at the highest extrusion temperature (170 °C) experienced the greatest color change (ΔE). The texture profile analysis (TPA) indicated that higher feed moisture content yielded extrudates with harder texture whereas, extrusion at higher temperature resulted in lower hardness. The scanning electron micrographs showed that the native quinoa flour encompassed both small- and large-sized starch granules while the extruded sample mainly consisted of disaggregated particles. Furthermore, extrusion cooking of samples with higher feed moisture content caused formation of more uniform starch aggregates with smoother surfaces.

Keywords: Extrusion, Functional properties, Gluten free, Quinoa

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 19, No. 3, Oct.-Nove. 2023, p. 451-462

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۹، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۲ ص. ۴۶۲-۴۵۱

مقاله پژوهشی

ارزیابی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و ریزساختار فرآورده بافت داده شده کینوآ

الهام قیامی[۱]- آرش کوچکی[۲]- الناز میلانی[۳]*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۷

چکیده

آرد کینوآ منبعی سرشار از اسیدآمینه‌های ضروری، فیبر غذایی، ویتامین‌های گروه ب، آلفاتوکروفرول و املاحی نظیر آهن و مس بوده و جایگزین مناسبی برای توسعه فرآورده‌های بدون گلوتن و بر پایه برنج می‌باشد. بدین منظور اصلاح برخی ویژگی‌های آرد کینوآ با فرایندهای مختلف می‌تواند در جهت بهبود کیفیت و توسعه این قبیل فرآورده‌ها مؤثر باشد. این پژوهش با هدف تأثیر شرایط فرایند اکستروژن شامل رطوبت اولیه خوراک (۱۶ و ۲۴ درصد) و دمای پخت (۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد) بر ویژگی‌های رطوبت، دانسیته توده، شاخص جذب آب، پارامترهای رنگ، سفتی بافت، و ریزساختار فرآورده بافت داده شده کینوا، مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج، افزایش همزمان رطوبت خوراک و دمای فرایند منجر به کاهش معنی دار رطوبت نهایی فراورده بافت داده شده کینوآ شد ($p<0.05$). نمونه فرایند شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با رطوبت ورودی ۱۶ درصد دارای کمترین میزان دانسیته بود. شاخص جذب آب کلیه نمونه‌های اکسترودشده بیشتر از نمونه شاهد بود و این پدیده با افزایش رطوبت اولیه خوراک و دمای پخت، بطرز معنی‌داری تشدید شد ($p<0.05$). فرآیند اکستروژن با کاهش معنی‌دار پارامتر L^* و افزایش پارامترهای a^* و b^* همراه بود ($p<0.05$). در حالی‌که افزایش دمای فرآیند منجر به افزایش تغییرات پارامترهای رنگ شد. افزایش رطوبت خوراک ورودی سبب افزایش سفتی بافت فراورده گردید اما همزمان با افزایش دمای پخت؛ سفتی بافت کاهش یافت چنان‌که کمترین میزان سفتی ۸/۵۹ نیوتن گزارش شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تجمعات بزرگ‌تر گرانول‌های نشاسته در نمونه‌های اکسترودشده در مقایسه با نمونه شاهد را نشان دادندکه با افزایش رطوبت خوراک ورودی، ظاهری یکنواخت‌تر و صاف‌تر به خود گرفتند. در مجموع می‌توان دریافت کاربرد اکستروژن به عنوان فناوری پیش پخت، روشی مطلوب برای بهبود ویژگی‌های عملکردی و تکنولوژیکی آرد کینوآ و توسعه فرآورده‌های بدون گلوتن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اکستروژن، فرآورده فاقد گلوتن، کینوآ، ویژگی‌های عملکردی

مقدمه

استراتژی تنوع فرآورده‌های غذایی سالم و مغذی سبب افزایش جهانی نرخ فروش سالانه گردیده است. تولید چنین فرآورده‌هایی منجر به انجام پژوهش‌های وسیعی با محوریت بهبود کیفیت آنها شده است. معرفی منابع ارزان قیمت جایگزین برنج و یا بهبود خصوصیات آردهای بدون گلوتن می‌تواند راهکار افزایش کیفیت این قبیل فرآورده‌ها باشد. آرد گندم پر مصرف‌ترین آرد مورد استفاده در صنایع پخت می‌باشد. با این حال، افرادی‌که از عارضه عدم تحمل گلوتن یا سلیاک رنج می‌برند، قادر به مصرف فرآورده‌های تولیدی از آرد گندم نیستند (El Khoury *et al.*, 2018). از جایگزین‌های جذاب گندم، کینوآ می‌باشد

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد و استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- دانشیار، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، جهاد دانشگاهی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: e.milani@jdm.ac.ir)

DOI: 10.22067/ifstrj.2022.74911.1139

(Alandia *et al*., 2020). کینوآ (*Chenopodium quinoa*) گیاهی یکساله ازدسته گیاهان دولپه‌ای است و به دلیل سازگاری بالای آن با شرایط سخت آب و هوایی، در بسیاری از نقاط دنیا قابل کشت است (El-Sohaimy *et al*., 2019). دانه کینوآ منبع غنی از فیبرهای تغذیه ای، آلفا توکوفرول‌ها و ترکیبات فنلی، ویتامین‌های گروه B، و مواد معدنی مانند آهن، مس، منگنز و پتاسیم، اسیدهای چرب امگا-۶ و ویتامین E بوده و پروتئین آن بیش از دو برابر غلاتی مانند ذرت و برنج است و برخلاف گندم که از فقر اسید آمینه‌هایی مانند لیزین رنج می‌برد، از تعادل مناسبی از اسیدهای آمینه ضروری برخوردار است (El-Sohaimy *et al*., 2019; El Hazzam *et al*., 2020; Xu *et al*., 2019) علی‌رغم تمامی جذابیت‌های تغذیه‌ای یادشده، به دلیل نبود گلوتن در ترکیب کینوآ و نقش بی بدیل آن در شکل‌گیری ساختار و بافت فرآورده‌های نانوایی، محصولات تولیدی از آرد کینوآ از پذیرش بالایی بین مصرف‌کنندگان برخوردار نمی‌باشند (Cannas *et al*., 2020). بدین منظور، از تیمارهای فیزیکی، شیمیایی و آنزیمی برای اصلاح توانایی پایین آردهای فاقد گلوتن در جذب آب و ایجاد شبکه سه‌بعدی پروتئینی و همچنین بهبود ویژگی‌های ناخوشایند حسی فرآورده‌های تولیدی از آنها مانند رنگ نامطلوب و سفتی زیاد استفاده شده است (El Khoury *et al*., 2018). در این میان، تیمارهای فیزیکی به دلیلی مزایایی همچون هزینه کم و پذیرش بالا نزد مصرف کنندگان (به دلیل عدم استفاده از ترکیبات شیمیایی سنتزی)، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند (Huang *et al*., 2020). فرایند هیدروترمال اکستروژن در میان تیمارهای فیزیکی مزایای بهتری در اصلاح ویژگی های فراورده با راندمان بالا در زمان کوتاه دارد (Otondi *et al*., 2020). پخت اکستروژن بواسطه طیف متنوع محصولات به یکی از مشهورترین فرآیندهای کاربردی و اقتصادی در نیم قرن اخیر تبدیل شده است (Liu *et al*., 2017). فرآیند اکستروژن پخت، به صورت مداوم است و با تلفیق انرژی مکانیکی (نیروی برشی) و حرارتی، منجر به پیش‌ژلاتینه‌شدن نشاسته، واسرشته‌شدن پروتئین، تخریب جزئی یا کلی ساختار بلوری و تشکیل کمپلکس‌های نشاسته-چربی و پروتئین-چربی می‌شود (Ma *et al*., 2019). تغییرات ساختاری ایجاد شده در آرد می‌تواند به گونه رضایت‌بخشی باعث بهبود جذب آب، حجم ویژه، ظرفیت جذب آب و ویسکوزیته خمیر شود (Ma *et al*., 2019). میزان تغییرات ساختاری و عملکردی محصول اکستروده‌شده وابسته به شرایط فرآیند اکستروژن از جمله دمای پخت، میزان رطوبت، نرخ خوراک‌دهی به اکسترودر، سرعت چرخش ماریپچ آن و ... می‌باشد (Huang *et al*., 2020; Morteza Jafari *et al*., 2017).

در پژوهشی در مورد بررسی تاثیر رطوبت خوراک و دمای پخت بر ویژگی‌های عملکردی و ساختاری آرد سورگوم نشان دادند که فرآیند اکستروژن با تغییر در ویژگی‌های ژلاتینه‌شدن نشاسته منجر به کاهش دانسیته و افزایش توانایی جذب آب آن شد. تاکنون پژوهش‌های مختلفی در خصوص اکستروژن آرد کامل غلات و یا ترکیب آنها انجام گرفته اما مطابق بررسی انجام شده پژوهش‌های محدودی درزمینه اکستروژن آرد کامل کینوا انجام شده است؛ در این ارتباط کوالسکی و همکاران (Kowalski *et al*., 2016) ویژگی فیزیکوشیمیایی کینوآ رقم چیلی را تحت تاثیر شرایط مختلف فرایند شامل سرعت چرخش، دما و رطوبت خوراک ورودی اکسترودر، براین اساس با افزایش دمای پخت تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد میزان روشنایی، ساپونین و ترکیبات فنولی کاهش یافت. درصد انبساط این رقم کینوآ در مقایسه با شرایط یکسان برای آرد گندم و ذرت کمتر بود از این رو رقم پیشنهادی، برای کاردبرد به عنوان فراورده پف داده نمی‌باشد. از این رو مطالعه رفتار آرد کینوآ تحت تاثیر شرایط مختلف فرایند هیدرو ترمال نظیر پخت اکستروژن با رویکرد بهبود ویژگی‌های تکنولوژیکی و عملکردی آن و همچنین معرفی فرآورده‌های غذایی متنوع پیش پخت از کینوآ به بازار مصرف از اهداف انجام مطالعه حاضر، قلمداد گردید.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه و پخت اکستروژن

دانه کینوآ بوسیله آسیاب آزمایشگاهی، پودر شد و برای دستیابی به آردی با دانه‌بندی یکنواخت، از الک با مش ۵۰ عبور داده شد. پس از تنظیم رطوبت آرد کینوآ به ۱۶ یا ۲۴ درصد به کمک روش مربع پیرسون، تیمار پخت اکستروژن در سه دمای متفاوت ۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ درجه سانتی گراد بوسیله اکسترودر دوماریپچ (مدل DS56، شرکت Jinan Saxin چین) با قطر ۴ میلی‌متر و سرعت چرخش ماردون ۱۵۰ دور در دقیقه و دبی ۱۵۰ کیلو در ساعت انجام شد.

رطوبت

رطوبت نمونه‌ها بوسیله روش خشک‌کردن در آون، در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد تا رسیدن به وزن ثابت، اندازه‌گیری شد (AOAC, 1990).

دانسیته توده

دانسیته توده نمونه‌های حجیم‌شده با روش جابجایی دانه‌های ارزن بر اساس استاندارد AOCC (2000) به شماره ۰۵-۱۰ محاسبه شد.

شاخص جذب آب

جهت اندازه‌گیری ضریب جذب آب میزان مقدار ۰/۵ تا ۱ گرم از نمونه به فالکونی که از قبل توزین شده اضافه شد. مقدار ۱۰ mL آب مقطر به نمونه اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای محیط همزده شد. در مرحله بعد، مخلوط حاصل در سانتریفیوژ با سرعت ۳۰۰۰ rpm به

مدت ۲۰ دقیقه سانتریفوژ گردید. در نهایت مایع رویی از مخلوط جدا و ماده ژل بجا مانده توزین شد. میزان شاخص جذب آب از نسبت وزن ژل باقیمانده به وزن نمونه خشک محاسبه و در واحدگرم بر گرم گزارش شد (Ardameh *et al.*, 2019).

مولفه‌های سنجش رنگ

پارامترهای رنگی با استفاده از دستگاه هانترلب (مدل colorFlex EZ، شرکت HunterLab، ایالات متحده) مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای این منظور، نمونه آردشده در ظرف مخصوص دستگاه ریخته شد تا سطح آن کاملا پوشانده شود و پس از قرار دادن محفظه تاریک بر روی ظرف، پارامترهای رنگی در فضای CIE L*a*b* اندازه‌گیری شدند. پارامترهای رنگ شامل L* نشان‌دهنده روشنایی رنگ (۰ سیاه، ۱۰۰ سفید)، a* نمایانگر رنگ سبز-قرمز (۱۲۰-، ۱۲۰+)،b* شاخص رنگ آبی-زرد (۱۲۰-، ۱۲۰+) و ΔE نشان‌دهنده تغییر رنگ می‌باشند. شاخص تغییر رنگ از معادله (۱) محاسبه شد:

$$E = \sqrt{(L_{\circ}^{*} - L^{*})^2 + (a_{\circ}^{*} - a^{*})^2 + (b_{\circ}^{*} - b^{*})^2} \qquad \text{معادله (۱)}$$

در این رابطه، پارامترهای با پانویس ∘ شاخص‌های رنگی نمونه تیمار نشده می‌باشند (Cannas *et al.*, 2020).

بافت‌سنجی

سختی با استفاده از دستگاه بافت‌سنج (مدل TA-Plus، شرکت Ametek Lloyd Instruments، ایالات متحده) و بکارگیری پروب استوانه‌ای ۲ میلی‌متری مورد ارزیابی قرار گرفت. پروب دستگاه با سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه با load cell ۱۰۰ نیوتن، نمونه‌ها را تا ۷۰ درصد قطر اولیه تحت فشار قرار دادند و بیشترین نیروی تراکمی به عنوان سختی گزارش شد (Jafari *et al.*, 2017).

ریزساختار

ریزساختار فرآورده حجیم‌شده آرد کینوآ با استفاده از میکروسکوپ الکترونیروبشی (مدل VP 1450، شرکت LEO، آلمان) اندازه‌گیری شد. نمونه‌های آسیاب‌شده بوسیله چسب دولایه بر پایه‌های آلومینیومی نصب شده و پس از پوشش‌دهی با لایه‌ای از طلا، در ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ کیلوولت، عکس‌برداری شدند (Mahasukhonthachat *et al.*, 2010).

تجزیه و تحلیل آماری

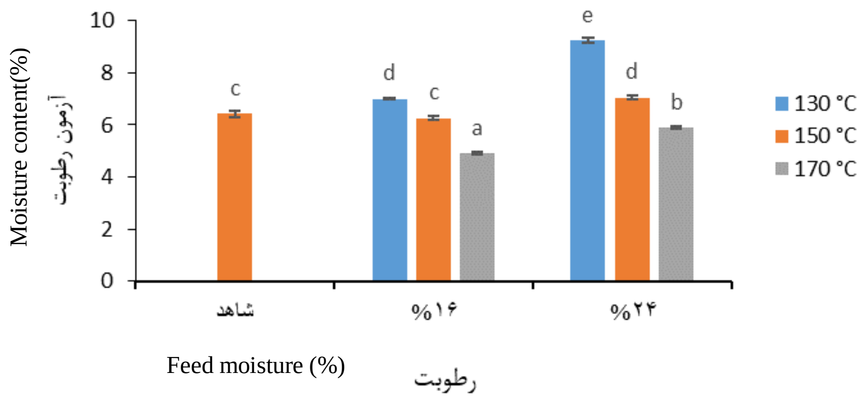
در این پژوهش به منظور بررسی اثر تیمارهای رطوبت در دو سطح ۱۶ و ۲۴ درصد، دما در سه سطح (۱۳۰، ۱۵۰و۱۷۰ درجه سانتی‌گراد) بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی فراورده بافت داده شده کینوا از طرح کاملا تصادفی در قالب فاکتوریل استفاده شد. تمام آزمون‌ها در سه تکرار انجام شد. به منظور مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد. در طراحی آزمایش، آنالیز نتایج و برازش منحنی‌ها از نرم‌افزار SPSS و EXCEL استفاده شد.

نتایج و بحث

رطوبت

فراورده‌های اکسترود شده رطوبت پایینی دارند و این عامل ماندگاری بالای این محصولات می‌باشد (O’Shea *et al.*, 2014). میزان رطوبت از دست رفته به فشار بخار ایجاد شده و محتوای رطوبتی اولیه محصول بستگی دارد. اثر متغیرهای فرایند بر تغییر رطوبت معنی دار بود ($p<0.05$). بطوری‌که محدوده تغییرات رطوبت نمونه‌ها ۴/۹- ۹/۲۵ درصد گزارش شد. بیشترین میزان رطوبت فراورده بافت داده شده به نمونه‌های با رطوبت خوراک ورودی بالا (۲۴ درصد) و کم‌ترین میزان به نمونه‌های با رطوبت خوراک ورودی پایین (۱۶ درصد) تعلق داشت (شکل ۱). نتایج مشابهی نیز توسط عصاره و همکاران (Asare *et al.*, 2012) در فرآورده حجیم بر پایه آرد برنج- بادام زمینی گزارش شده است. تعدادی از محققین اعمال فرآیند اکستروژن در دما و سرعت چرخش مارپیچ بالا را سبب وقوع تغییرات ساختاری در پروتئین و در نهایت کاهش رطوبت محصول دانسته‌اند. با توجه به زمان توقف یکسان نمونه‌ها در اکستروژن، هر چه رطوبت اولیه بیشتر باشد، رطوبت نهایی آن پس از پخت اکستروژن نیز بالاتر است؛ افزایش رطوبت سبب کاهش دمای خمیر مذاب در حین عبور از هلیس گشته و ویسکوزیته خمیر کاهش یافته و همزمان با خروج محصول با رطوبت بالاتر خارج می گردد (O’Shea *et al.*, 2014). همانگونه که در شکل ۱ نیز می‌توان دید، رطوبت نهایی محصول بدست آمده از اکسترود آرد کینوآ با رطوبت اولیه ۲۴ درصد در دمای اکستروژن ۱۳۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به گونه معنی‌داری بیشتر از نمونه شاهد (آرد کینوا اکسترود نشده) بود. افزایش رطوبت سبب کاهش دمای محفظه می‌شود. دمای پایین فرآیند سبب کاهش ژلاتیناسیون و متعاقبا کاهش مصرف آب در این مرحله وافزایش رطوبت در فراورده بافت داده شده گردید. پس از آن، با بالا رفتن دما، تبخیر بیشتر آب در این دماها اتفاق می‌افتد که در نتیجه آن رطوبت نهایی کاهش می‌یابد. در تحقیق صورت گرفته توسط اردمه و همکاران (Ardameh *et al.*, 2019) در ارتباط با بررسی شرایط فرایند اکستروژن بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اسنک بر پایه مغز گردو و بلغور، گزارش شد که افزایش میزان رطوبت اولیه سبب افزایش مقدار رطوبت نهایی پس از اکستروژن و پخت ماده غذایی شده است. افزایش دمای اکستروژن سبب شد تا رطوبت نهایی اکسترود بدست‌آمده در

دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به صورت معنی‌داری کمتر از نمونه شاهد شود. تاثیر کاهشی و معنی‌دار دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد در ارتباط با نمونه‌های با درصد رطوبت اولیه ۱۶ درصد نیز مشاهده شد؛ بروز پدیده دکسترینه شدن نشاسته همگام با کاهش سهم ژلاتیناسیون سبب خروج رطوبت از ماتریس و در نهایت کاهش محتوای رطوبتی فراورده بافت داده شده گردید. در تحقیق صورت گرفته توسط کوالسکی و همکاران (Kowalski *et al.*, 2016) و شریفی و همکاران (۱۳۹۴) چنین رفتاری برای کینوا اکسترود شده و بلغور ذرت فرآوری‌شده مشاهده شد.



شکل ۱- اثر دما و رطوبت خوراک بر میزان رطوبت نمونه‌های فرآورده کینوا حجیم‌شده

حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

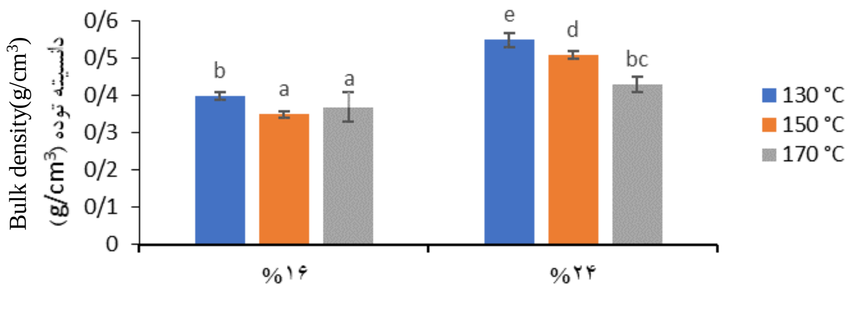
Fig. 1- The effect of die temperature and feed moisture on final moisture content of extruded quinoa product

Different English letters indicate statistically significant differences at the 95% confidence level.

دانسیته توده

دانسیته توده شاخصی در مورد تغییرات ساختاری یک ماده درطی فرایند اکستروژن میباشد. مطابق نتایج جدول آنالیز واریانس تغییرات رطوبت و دمای پخت بر روند تغییرات دانسیته معنی‌دار بود ($p<0.05$). نمودار ستونی تغییرات دانسیته توده با دمای اکسترودر برای نمونه‌های آرد کینوآ در دو درصد رطوبت خوراک ۱۶ و ۲۴ در شکل ۲ ارائه شده است. دانسیته توده نمونه‌های فرآورده کینوا حجیم‌شده در محدوده ۰/۳۴ تا ۰/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. دامنه دانسیته فرآورده‌های حجیم‌شده معمولا بین ۰/۱۱۷ تا ۰/۵۰۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است ولی هر چه دانسیته فرآورده حجیم‌شده کمتر باشد مطلوب‌تر است (Doğan and Karwe, 2003).

کمترین میزان دانسیته مربوط به کمترین رطوبت در بالاترین دما یعنی رطوبت ۱۶ درصد و دمای ۱۵۰°C بود در حالی که بیشترین مقدار آن در تیمار بالاترین رطوبت و کمترین دما یعنی تیمار رطوبت ۲۴ درصد و دمای ۱۳۰°C به دست آمد. وابستگی دانسیته به رطوبت آرد ورودی به دلیل تاثیر آب بر الاستیسیته مواد بر پایه نشاسته می‌باشد. افزایش رطوبت خوراک ممکن است از طریق نرم کردن (پلاستیکی شدن) ماده مذاب درون اکسترودر سبب کاهش الاستیسیته خمیر شود. نرم شدن ماده مذاب درون اکسترودر به واسطه حضور آب می‌تواند ناشی از کاهش انرژی مکانیکی ویژه و افزایش درجه ژلاتینه‌شدن باشد که خود، کاهش در دانسیته نهایی فرآورده کینوا حجیم‌شده را در پی داشت (Dura *et al.*, 2014) در تحقیقات به عمل آمده گزارش شده کاهش دانسیته در برنج اکسترود شده با افزایش دما و سرعت ماریپچ، احتمالا به واسطه ژلاتینه شدن نشاسته است. هنگامی‌که ژلاتینه شدن مواد نشاسته‌ای افزایش می‌یابد، حجم محصول نیز افزایش یافته که دانسیته پایینی را در نمونه سبب می‌شود. جعفری و همکاران (Jafari *et al.*, 2017) نیز در بررسی تاثیر اکستروژن بر آرد سورگوم نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و کمترین دانسیته را در نمونه تیمار شده با بالاترین دما و کمترین میزان رطوبت گزارش کردند. افزایش دمای پخت اکستروژن تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد در رطوبت اولیه ۱۶ درصد، باعث افزایش چشمگیر دانسیته توده شد. افزایش دما و کاهش رطوبت اولیه سبب کمرنگ‌تر شدن نقش آب در ژلاتینه شدن و اثر نرم‌کنندگی خمیر توسط آب می شود. بنابراین با افزایش دمای اکستروژن تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد در رطوبت ۱۶ درصد بدلیل تاثیر بیشتر اعمال نیروی برشی در دمای بالا، دکسترینه شدن و تخریب ماتریس نشاسته صورت گرفته و با تخریب دیواره سلول‌های هوایی خروج رطوبت و کاهش انبساط شوندگی فراورده نهایی رخ داده است (Liu *et al.*, 2017). از آنجا که شدت تغییرات انبساط شوندگی رفتار عکس با دانسیته دارد، افزایش دانسیته در این نمونه مشاهده شد.



شکل ۲- اثر دما و رطوبت خوراک بر میزان دانسیته توده نمونه‌های فرآورده کینوا حجیم‌شده

حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

Fig. 2- The effect of die temperature and feed moisture on bulk density of extruded quinoa product

Different English letters indicate statistically significant differences at the 95% confidence level.

شاخص جذب آب

این شاخص بیانگر میزان آب جذب شده توسط گرانول‌های نشاسته است و به عنوان معرف ژلاتینه شدن می‌باشد. شاخص جذب آب با حجم نشاسته رابطه مستقیم دارد و میزان تجزیه هیدرولیکی نشاسته را نشان می‌دهد (Lazouand Krokida, 2011). به طور کلی هرچقدر زنجیره‌های آمیلوز و آمیلوپکتین نشاسته کمتر آسیب دیده باشند و گروه های هیدروفیل بیشتری در سطح خارجی مولکول قرار گیرند، امکان اتصالات با آب افزایش و در نتیجه میزان جذب آب افزایش می‌یابد (Ji *et al.*, 2004; Lazou and Krokida, 2011). نتایج بررسی تاثیر متغیرهای فرآیند اکستروژن بر شاخص جذب آب آرد کینوآ در جدول ۱ ارائه شده است. شاخص جذب آب تمام نمونه‌های حجیم‌شده در مقایسه با نمونه شاهد به گونه معنی‌داری ($p<0.05$) بالاتر بود که نشان می‌دهد که درجه ژلاتینه شدن در اثر پخت اکستروژن افزایش یافته است. یافته‌ها همچنین نشان دادند که افزایش همزمان دما و رطوبت باعث افزایش شاخص جذب آب اکسترودهای کینوآ شدند و از این رو، بیشترین میزان جذب آب برای نمونه حجیم‌شده در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۲۴ درصد مشاهده شد. پخت اکستروژن سبب کاهش بلورینگی آرد کینوا می‌شود و همین موضوع عامل افزایش میزان جذب آب آرد است. به عبارتی، افزایش محتوای رطوبت خوراک به واسطه اثر نرم‌کنندگی‌اش سبب کاهش تخریب گرانول‌های نشاسته شده و شاخص جذب آب را افزایش می‌دهد. آلووی و همکاران (Aluwi *et al.*, 2016) نیز در بررسی تاثیر برخی از پارامترهای فرآیند اکستروژن بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی فرآورده حجیم‌شده از آرد بدست‌آمده از گونه‌های مختلف کینوآ گزارش کردند که به طور کلی، افزایش رطوبت خوراک منجر به بهبود شاخص جذب آب محصول می شود. برای نمونه‌های با محتوای رطوبت پایین، سطح ذرات نسبتا صاف است و از تخلخل کمی برخوردار هستند ولی با افزایش دمای قالب و محتوای رطوبت اولیه در خوراک، تخلخل محصولات به دست آمده از پخت اکستروژن بیشتر شده و آب بیشتری توسط آن‌ها درون این خلل و فرج‌ها قابل جذب و نگهداری است (Jafari *et al.*, 2017). در واقع، اعمال همزمان نیروی برشی و حرارتی طی فرآیند اکستروژن، باعث ژلاتیناسیون نشاسته، افزایش فیبرهای محلول، افزایش دناتوراسیون پروتئین‌ها و در پی آن افزایش گروه‌های با ویژگی‌های آب دوستی می‌شود که همگی افزایش توانایی جذب آب آرد فرآیندشده را به همراه دارند (Ma *et al.*, 2019). لازم به ذکر است که شاخص جذب آب نمونه‌های فرآورده کینوآ حجیم‌شده در محدوده ۴/۱۶ تا ۵/۷۲ گرم بر گرم قرار داشت (جدول ۱). در پژوهش مشابه‌ای در این زمینه، شاخص جذب آب فرآورده کینوآ حجیم‌شده در محدوده ۲/۳۵ تا ۳/۰۵ گزارش شد (Kowalski *et al.*, 2016).

جدول ۱- شاخص جذب آب فرآورده کینوای حجیم‌شده

Table 1- Water absorption index of extruded quinoa product

Die temperature (°C) دما	Feed moisture (%) رطوبت	Water absorption index (g/g) شاخص جذب آب
Control sample	–	2.42 ± 0.10^{e}
130	16	4.46 ± 0.20^{c}
	24	4.98 ± 0.08^{ab}
150	16	4.80 ± 0.20^{b}
	24	4.96 ± 0.03^{ab}
170	16	4.17 ± 0.01^{d}
	24	5.07 ± 0.10^{a}

حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

Different English letters indicate statistically significant differences at the 95% confidence level.

سنجش مولفه‌های رنگی

با توجه به جدول ۲ تغییرات شاخص‌های *L (روشنایی=۱۰۰ تا سیاهی=۰)، *a (قرمزی=+۶۰ تا سبزی= -۶۰) و *b (زردی= +۶۰ تا آبی= -۶۰) تعیین شده است. به طور کلی بازه تغییرات شاخص‌های (۸۳/۰۵-۶۳/۷۵)=*L، (۰/۵-۵۲/۴۳)=*a و (۱۴/۳-۲۷/۷)=*b تعیین شد. مطابق نتایج با افزایش دمای نمونه‌ها شاخص روشنایی (*L) کاهش و شاخص قرمزی (*a) افزایش یافت $p<0.05$؛ که دلیل آن افزایش واکنش مایلارد در دماهای بالا می‌باشد. تغییرات *L طی فرآیند اکستروژن، اطلاعات مهمی در رابطه با درجه قهوه‌ای شدن، واکنش میلارد و همچنین تخریب رنگدانه ارائه می‌دهد (Ji *et al*., 2004). نتایج به دست آمده نشان داد؛ دمای اکسترودر و میزان رطوبت اولیه تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر پارامترهای رنگی آرد کینوا اکسترودشده داشتند. در واقع، تمامی نمونه‌های اکسترودشده از پارامتر *L کمتر و *a و *b بیشتری نسبت به نمونه شاهد برخوردار بودند که این امر با افزایش دمای فرآیند اکستروژن تشدید شد. با افزایش دما، سرعت اکسیداسیون رنگدانه‌های موجود در آرد افزایش و در نتیجه روشنایی محصول نهایی کاهش می یابد (Lazou & Krokida, 2011). در حرارت بالا، امکان انجام واکنش کاراملیزاسیون که عامل تیرگی رنگ و کاهش روشنی بسیاری از محصولات غذایی حرارت دیده می‌باشد نیز افزایش می‌یابد. از دیگر عوامل احتمالی دخیل در کاهش پارامتر روشنایی محصول می‌توان به واکنش قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی یا میلارد اشاره کرد که انجام آن در آرد کینوآ به دلیل دارا بودن اسیدآمینه و قند، کاملا محتمل می‌باشد. این در حالی بود که افزایش رطوبت خوراک ورودی در تمامی دماهای اکستروژن، منجر به تخفیف اثر کاهشی فرآیند بر *L و اثر افزایشی آن بر *a و *b شد (جدول ۲). تاثیر افزایش رطوبت خوراک ورودی از ۱۶ به ۲۴ درصد در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد بسیار مشهود بود به گونه‌ای که پارامترهای رنگی نمونه حاوی ۲۴ درصد رطوبت، مشابه با نمونه شاهد بودند. چنین مشاهداتی توسط گولاتی و همکاران (Gulati *et al*., 2016) نیز برای فرآورده گندم حجیم‌شده گزارش شده است. شارما و همکاران (Sharma *et al*., 2015)، عنوان داشتند که در رطوبت بالای خوراک ورودی، لیزین به عنوان فعالترین اسید آمینه کمتر در دسترس قرار دارد، در نتیجه سرعت واکنش قهوه‌ای شدن کاهش و پارامتر *L نمونه حجیم‌شده افزایش می‌یابد. با توجه به حضور قابل توجه اسیدآمینه لیزین در کینوآ، فرضیه یادشده در مورد پژوهش حاضر نیز قابل تعمیم است (El-Sohaimy *et al*., 2019). در رطوبت بالا بخشی از گرما صرف تبخیر آب موجود در نمونه شده و در نتیجه از سرعت اکسیداسیون رنگدانه‌های موجود در آرد کاسته می‌شود (De Pilli *et al*., 2008). بر اساس روند تغییرات پارامترهای رنگی عنوان شده، شاخص تغییر رنگ با افزایش دما افزایش و با افزایش رطوبت کاهش یافت به گونه‌ای که نمونه اکسترودشده در بالاترین دما (۱۷۰ درجه سانتی‌گراد) و کمترین رطوبت (۱۶ درصد)، متحمل بیشترین تغییر رنگ شد.

سختی بافت

سختی فراورده غذایی اکسترودشده به میزان انبساط وساختار سلول های محصول بستگی دارد. سختی، بیشترین نیروی موردنیاز پروب برای نفوذ به داخل نمونه می‌باشد. هر چقدر میزان بیشینه نیرو بیشتر باشد، میزان سختی نیز بیشتراست. سختی و یا تردی محصولات با توجه به درک حسی انسان از فرآورده‌های اکسترود شده سنجیده می شود. خصوصیات حسی به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند و عوامل مختلفی از جمله اجزای تشکیل دهنده، رطوبت، دمای اکسترود، میزان انبساط، میزان تخلخل و... بر روی خصوصیات ارگانولپتیکی اثر دارند. سختی نمونه‌ها با توجه به حداکثر نیرو در حین پایین آمدن پروب دستگاه تعیین می‌شود.

جدول ۲- نتایج آزمون تغییر رنگ و هانترلب
Table 2- Results of color change and Hunter-lab test

Die temperature (°C) دما	Feed moisture (%) رطوبت	L* شاخص روشنایی رنگ	a* شاخص رنگ سبز-قرمز	b* شاخص رنگ آبی-زرد	ΔE تغییر رنگ
Control sample	–	83.05± 0.11[a]	-0.52 ± 0.01[e]	14.79 ± 0.11[e]	–
130	16	74.78± 0.01[b]	2.69 ± 0.01[c]	24.68 ± 0.01[d]	0.13 ± 0.004[c]
	24	63.75± 0.02[e]	1.20 ± 0.01[d]	24.65 ± 0.02[d]	0.10 ± 0.004[d]
150	16	72.44± 0.02[c]	3.25± 0.04[b]	25.76 ± 0.02[c]	0.15 ± 0.005[b]
	24	70.12± 0.02[d]	2.59 ± 0.20[c]	25.92 ± 0.02[b]	0.12 ± 0.006[c]
170	16	63.32± 0.02[f]	5.43 ± 0.01[a]	27.00 ± 0.01[a]	0.25 ± 0.004[a]
	24	83.05± 0.11[a]	-0.52 ± 0.01[e]	14.79 ± 0.11[e]	0.04 ± 0.01[e]

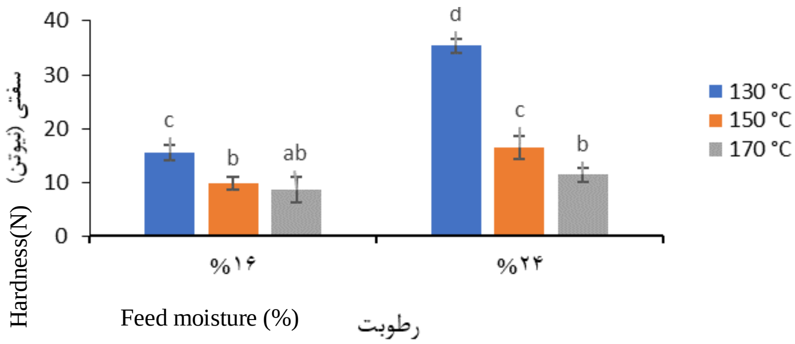
حروف انگلیسی متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.
Different English letters indicate statistically significant differences at the 95% confidence level.

میزان سختی فرآورده حجیم‌شده آرد کینوآ در شرایط دمایی و رطوبتی متفاوت در شکل ۳ ارائه شده است. افزایش دما در هر دو سطح رطوبت مورد بررسی، کاهش معنی‌دار ($p<0.05$) سختی بافت را به همراه داشت. ولی در سوی دیگر، افزایش رطوبت در هر یک از دماهای مورد بررسی، منجر به افزایش معنی‌دار سختی شد. بر این اساس، نمونه اکسترودشده در بالاترین دما (۱۷۰ درجه سانتی‌گراد) ورطوبت کمتر (۱۶ درصد)، از کمترین سختی و نمونه اکسترودشده در پایین‌ترین دما (۱۳۰ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت بیشتر (۲۴ درصد)، از بالاترین سختی برخوردار بودند. همچنین لازم به ذکر است که سختی نمونه اکستروده شده در رطوبت ۱۶ درصد و دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد و نمونه تیمارشده در رطوبت ۲۴ درصد و دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، مشابه هم بودند. عدم تفاوت معنی‌دار آماری سختی، برای نمونه اکسترودشده در رطوبت ۱۶ درصد و دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و نمونه تیمارشده در رطوبت ۲۴ درصد و دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد نیز مشاهده شد. تاثیر افزایشی رطوبت خوراک ورودی بر سفتی و تاثیر کاهشی دما اکستروژن بر آن را می‌توان از نقطه نظر تاثیر این دو پارامتر بر فرآیند ژلاتیناسیون نشاسته به عنوان اصلی‌ترین عامل انبساط فرآورده‌های اکسترودشده مورد بررسی قرار داد (Aluwi *et al.*, 2016).

افزایش دما طی فرایند اکستروژن، باعث کاهش ویسکوزیته خمیر و افزایش فشار بخار آب و همچنین کاهش ضخامت دیواره حباب‌های هوایی شده و رشد حباب‌ها بهتر و راحت‌تر اتفاق افتاده در نتیجه میزان سختی بافت کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی از یانیتیس و همکاران (۲۰۰۹)، لطفی و همکاران (۲۰۲۰)، دینگ و همکاران (۲۰۰۶)، آلتان و همکاران (۲۰۰۸)، پتراکی و همکاران (۲۰۰۷) گزارش شد. حال آنکه، رطوبت بالاتر خوراک، کاهش حجیم‌شدن نمونه‌ها و افزایش سختی را به همراه داشته است. کارو و دوگان و (Karwe and Doğan, 2003) نیز عنوان داشتند که افزایش رطوبت خوراک، کاهش انبساط آرد کینوآ را در نتیجه فرآیند اکستروژن در پی داشت. تاثیر افزایشی رطوبت بر سختی نمونه، پیشتر برای محصول اکسترود شده سورگوم (Jadhav *et al.*, 2013) و ذرت (Mazumder *et al.*, 2007). نیز گزارش شده است. منگ و همکاران (Meng *et al.*, 2010) نیز مشاهده کردند که افزایش دمای اکستروژن (۱۵۰-۱۷۰ درجه سانتی‌گراد)، کاهش سفتی اسنک بر پایه اکسترود آرد نخود را به همراه داشت. گفتنی است که در این پژوهش، میزان سفتی فرآورده حجیم‌شده کینوآ بین ۶/۴۷ تا ۳۵/۳۸ نیوتن متغیر بود. در این ارتباط، تاورنا و همکاران (Taverna *et al.*, 2012) دامنه ۸/۵۳ تا ۱۹/۹۱ نیوتن را برای فرآورده حجیم‌شده آرد کینوآ و کاساوا گزارش کردند که با توجه به تفاوت ترکیب خوراک آنها با پژوهش جاری، تفاوت مشاهده شده قابل توجیه است.

ریزساختار

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی آرد کینوآ تیمارنشده در مقایسه با همتای اکسترودشده آن در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با رطوبت ورودی خوراک ۱۶ و ۲۴ درصد در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل می‌توان دید، ذرات نشاسته به صورت چند ضلعی و اشکال نامنظم بودند. مهسوخونتاچات و همکاران (Mahasukhonthachat *et al.*, 2010). مورفولوژی چند ضلعی نامنظم و کروی را برای گرانول‌های نشاسته در آرد سورگوم گزارش کردند. نمونه شاهد دارای هر دو نوع ذرات بزرگ و کوچک بود و پخت اکستروژن آرد کینوا سبب تشکیل ذرات بزرگ‌تر تفکیک شده از هم شد. دورا و همکاران (Dura *et al.*, 2014) بر این باور بودند که آمیلوز نشت کرده از نشاسته در طی فرآیند پخت اکستروژن به عنوان یک عامل چسبنده عمل نموده و سبب اتصال ذرات کوچک و بزرگ به هم و تشکیل ذرات بزرگ‌تر می‌شود. در تصاویر میکروسکوپی، حضور بخش‌های پروتئینی در کنار گرانول‌های نشاسته محرز است که این امر در گزارش مربوط به پخت اکستروژن آرد سورگوم (Mahasukhonthachat *et al.*, 2010) نیز مشاهده شده است.

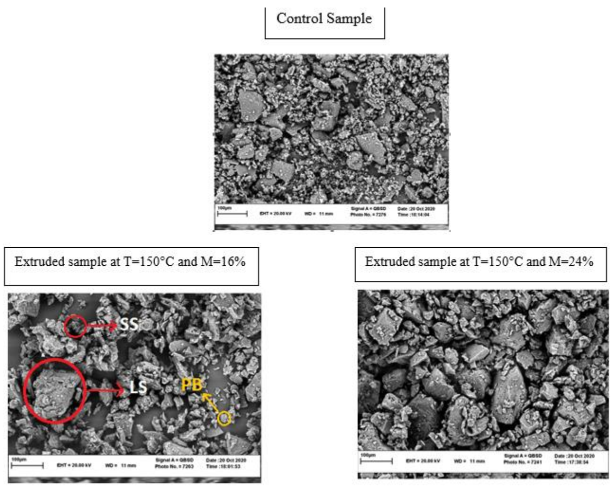


شکل ۳- اثر دما و رطوبت خوراک بر میزان سختی بافت اسنک تولیدی ازنمونه‌های آرد کینوا حجیم‌شده

حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

Fig. 3- The effect of die temperature and feed moisture on the texture hardness of snacks produced from extruded quinoa flour samples

Different English letters indicate statistically significant differences at the 95% confidence level.



شکل ٤- تصاویر میکروسکوپ الکترونی آرد کینوآ تیمارنشده و اکسترودشده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در دو رطوبت ١٦ و ٢٤ درصد (SS: ذرات نشاسته کوچک LS: ذرات بزرگ نشاسته و PB: بخش پروتئینی)

Fig. 4- Electron microscope images of quinoa flour untreated and extruded at 150°C in two feed moisture levels of 16 and 24% (SS: small starch particles, LS: large starch particles and PB: protein part)

در هنگام اعمال شرایط اکستروژن شدید، اغلب بخش‌های پروتئینی به دلیل افزایش نیروهای برشی ناپدید شدند. در خوراک ورودی با رطوبت بالا به دلیل اثر نرم‌کنندگی آب، تخریب ناشی از تنش کاهش می‌یابد و از این رو بخش‌های پروتئینی قابل مشاهده هستند. با افزایش دمای اکسترود، نشت آمیلوز موجب اتصال سطوح خارجی ذرات به همدیگر و در نهایت سبب ایجاد سطحی صاف‌تر و یکنواخت تر شد. چنین مشاهداتی توسط دورا و همکاران (Dura *et al*., 2014) و جعفری و همکاران (Jafari *et al*., 2017) نیز گزارش شده است.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان دادند که متغیرهای فرآیند اکستروژن تاثیر چشمگیری بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و ریزساختار آرد کینوآ داشتند ($p<0.05$) . بر پایه این یافته‌ها، نمونه‌های اکسترودشده در دمای بالاتر و یا رطوبت کمتر خوراک، از رطوبت نهایی کمتری برخوردار بودند ولی افزایش هر دو متغیر فرآیند، افزایش شاخص جذب آب فرآورده اکسترودشده را به همراه داشت. در ارتباط با پارامترهای رنگ و سفتی، متغیرهای فرآیند، تاثیر دوگانه‌ای را نشان دادند. به عبارت دیگر، در حالی‌که افزایش دمای اکستروژن، کاهش سفتی و روشنایی ظاهر (افزایش تیرگی) نمونه‌ها را به همراه داشت، افزایش رطوبت خوراک ورودی باعث سفتی بیشتر نمونه شد و از کاهش روشنایی نمونه در اثر حرارت کاست. همچنین لازم به ذکر است که فرآورده حجیم‌شده کینوآ نسبت به آرد اکسترود نشده آن (نمونه شاهد)، از توانایی جذب آب به مراتب بالاتری برخوردار بود ولی در عین حال، ظاهری تیره‌تر پیدا کرد که البته با توجه به اینکه معمولا چنین فرآورده‌هایی با رنگ‌های خوراکی پوشش داده می‌شوند، این امر تاثیری در پذیرش مصرف کنندگان نخواهد داشت. بررسی ریزساختار نمونه‌ها نشان داد که فرآیند اکستروژن منجر به تشکیل ذرات بزرگتر و جدااز هم شد که در رطوبت بالاتر خوراک اولیه، از ظاهری صاف‌تر و یکنواخت‌تر برخوردار بودند. مطابق نتایج با در نظر گرفتن شرایط مطلوب شامل منظور کردن بیشترین میزان جذب آب، دانسته توده و روشنایی رنگ و کمترین میزان سفتی بافت تیمار با ۲۴ درصد رطوبت ورودی و اعمال دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان نمونه مطلوب جهت فرایندهای بعدی معرفی گردید.

منابع

1. AACC. (2000). Approved methods of the American association of cereal chemists. 54-21.
2. AOAC International. (1990). *Official Methods of Analysis of AOAC*. AOAC International, Gaithersberg, MD.
3. Alandia, G., Rodriguez, J.P., Jacobsen, S.E., Bazile, D., & Condori, B. (2020). Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region. *Global Food Security*, *26*(September), 100429. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100429
4. Aluwi, N.A., Gu, B.J., Dhumal, G.S., Medina-Meza, I.G., Murphy, K.M., & Ganjyal, G.M. (2016). Impacts of scarification and degermination on the expansion characteristics of select Quinoa varieties during extrusion processing. *Journal of Food Science*, *81*(12), E2939–E2949. https://doi.org/10.1111/1750-3841.13512
5. Ardameh, L., Beiraghi-Toosi, S., & Golimovahed, G. (2019). *Effect of extrusion and formulation conditions on physicochemical characteristics of snack based on walnut and corn grits*. https://doi.org/10.22104/jift.2019.3505.1841
6. Asare, E.K., Sefa-Dedeh, S., Afoakwa, E.O., Sakyi-Dawson, E., & Budu, A.S. (2012). Extrusion cooking of rice-groundnut-cowpea mixtures - effects of extruder characteristics on nutritive value and physico-functional properties of extrudates using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, *36*(5), 465–476. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2011.00605.x
7. Cannas, M., Pulina, S., Conte, P., Del Caro, A., Urgeghe, P.P., Piga, A., & Fadda, C. (2020). Effect of substitution of rice flour with quinoa flour on the chemical-physical, nutritional, volatile and sensory parameters of gluten-free ladyfinger biscuits. *Foods*, *9*(6). https://doi.org/10.3390/foods9060808
8. De Pilli, T., Jouppila, K., Ikonen, J., Kansikas, J., Derossi, A., & Severini, C. (2008). Study on formation of starch-lipid complexes during extrusion-cooking of almond flour. *Journal of Food Engineering*, *87*(4), 495–504. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.028
9. Doğan, H., & Karwe, M.V. (2003). Physicochemical properties of quinoa extrudates. *Food Science and Technology International*, *9*(2), 101–114. https://doi.org/10.1177/1082013203009002006
10. Dura, A., Błaszczak, W., & Rosell, C.M. (2014). Functionality of porous starch obtained by amylase or amyloglucosidase treatments. *Carbohydrate Polymers*, *101*(1), 837–845. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.013
11. El-Sohaimy, S.A., Shehata, M.G., Mehany, T., & Zeitoun, M.A. (2019). Nutritional, physicochemical, and sensorial evaluation of flat bread supplemented with Quinoa flour. *International Journal of Food Science*, *2019*. https://doi.org/10.1155/2019/4686727
12. El Hazzam, K., Hafsa, J., Sobeh, M., Mhada, M., Taourirte, M., Kacimi, K.E.L., & Yasri, A. (2020). An insight into saponins from Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd): A review. *Molecules*, *25*(5), 1–22. https://doi.org/10.3390/molecules25051059
13. El Khoury, D., Balfour-Ducharme, S., & Joye, I.J. (2018). A review on the gluten-free diet: Technological and nutritional challenges. *Nutrients*, *10*(10), 1–25. https://doi.org/10.3390/nu10101410
14. Gulati, P., Weier, S.A., Santra, D., Subbiah, J., & Rose, D.J. (2016). Effects of feed moisture and extruder screw speed and temperature on physical characteristics and antioxidant activity of extruded proso millet (*Panicum miliaceum*) flour. *International Journal of Food Science and Technology*, *51*(1), 114–122. https://doi.org/10.1111/ijfs.12974
15. Huang, S., Roman, L., Martinez, M.M., & Bohrer, B.M. (2020). Modification of physicochemical properties of breadfruit flour using different twin-screw extrusion conditions and its application in soy protein gels. *Foods*, *9*(8). https://doi.org/10.3390/foods9081071
16. Jadhav, M.V., & Annapure, U.S. (2013). Effect of extrusion process parameters and particle size of sorghum flour on expanded snacks prepared using different varieties of sorghum (*Sorghum bicolour* L.). *Journal of Agricultural Science and Technology. B*, *3*(2B), 71.
17. Jafari, M., Koocheki, A., & Milani, E. (2017). *Effect of extrusion variable on physicochemical properties of extruded sorghum*. 1–12. http://fsct.modares.ac.ir/article-1547-7-fa.html
18. Jafari, M., Koocheki, A., & Milani, E. (2017). Effect of extrusion cooking on chemical structure, morphology, crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates. *Journal of Cereal Science*, *75*, 324–331. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.05.005
19. Ji, Y., Ao, Z., Han, J.A., Jane, J.L., & BeMiller, J.N. (2004). Waxy maize starch subpopulations with different gelatinization temperatures. *Carbohydrate Polymers*, *57*(2), 177–190. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.04.017
20. Kowalski, J., Medina, Meza Ilce Gabriela Bhim, B.T., Kevin, M.M., & Girish, M.G. (2016). *Extrusion processing characteristics of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) var. Cherry Vanilla*.
21. Lazou, A., & Krokida, M. (2011). Thermal characterisation of corn-lentil extruded snacks. *Food Chemistry*, *127*(4), 1625–1633. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.029

22. Liu, Y., Chen, J., Luo, S., Li, C., Ye, J., Liu, C., & Gilbert, R. G. (2017). Physicochemical and structural properties of pregelatinized starch prepared by improved extrusion cooking technology. *Carbohydrate Polymers*, *175*, 265–272. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.07.084
23. Ma, J., Kaori, F., Ma, L., Gao, M., Dong, C., Wang, J., & Luan, G. (2019). The effects of extruded black rice flour on rheological and structural properties of wheat-based dough and bread quality. *International Journal of Food Science and Technology*, *54*(5), 1729–1740. https://doi.org/10.1111/ijfs.14062
24. Mahasukhonthachat, K., Sopade, P.A., & Gidley, M.J. (2010). Kinetics of starch digestion and functional properties of twin-screw extruded sorghum. *Journal of Cereal Science*, *51*(3), 392–401. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.02.008
25. Mazumder, P., Roopa, B.S., & Bhattacharya, S. (2007). Textural attributes of a model snack food at different moisture contents. *Journal of Food Engineering*, *79*(2), 511–516. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.011
26. Meng, X., Threinen, D., Hansen, M., & Driedger, D. (2010). Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of a chickpea flour-based snack. *Food Research International*, *43*(2), 650–658. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.016
27. O'Shea, N., Arendt, E., & Gallagher, E. (2014). Enhancing an extruded puffed snack by optimising die head temperature, screw speed and apple pomace inclusion. *Food and Bioprocess Technology*, *7*(6), 1767–1782. https://doi.org/10.1007/s11947-013-1181-x
28. Otondi, E.A., Nduko, J.M., & Omwamba, M. (2020). Physico-chemical properties of extruded cassava-chia seed instant flour. *Journal of Agriculture and Food Research*, *2*(July), 100058. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100058
29. Sharma, S., Singh, N., & Singh, B. (2015). Effect of extrusion on morphology, structural, functional properties and in vitro digestibility of corn, field pea and kidney bean starches. *Starch/Staerke*, *67*(9–10), 721–728. https://doi.org/10.1002/star.201500021
30. Taverna, L.G., Leonel, M., & Mischan, M.M. (2012). Changes in physical properties of extruded sour cassava starch and quinoa flour blend snacks. *Food Science and Technology*, *32*(4), 826–834. https://doi.org/10.1590/s0101-20612012005000113
31. Xu, X., Luo, Z., Yang, Q., Xiao, Z., & Lu, X. (2019). Effect of quinoa flour on baking performance, antioxidant properties and digestibility of wheat bread. *Food Chemistry*, *294*(December 2018), 87–95. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.037